

01;09

Принципы построения „деформационной антенны Земли“

© Г.И. Долгих

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия
E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

Поступило в Редакцию 3 июля 2019 г.

В окончательной редакции 24 декабря 2019 г.

Принято к публикации 24 декабря 2019 г.

Обсуждаются принципы построения „деформационной антенны Земли“ на территории России, предназначенной для регистрации и пеленгации колебаний и волн широкого диапазона частот (от инфразвукового до диапазона гравитационных волн). Располагая лазерные деформографы классического и маятникового типов в определенных точках России, можно получить уникальный комплекс, по чувствительности и частотному диапазону превосходящий комплекс проекта LIGO.

Ключевые слова: система пространственно разнесенных лазерных деформографов, гравитационный сигнал, звук, инфразвук.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.07.49210.17959

В работе [1] посредством использования специально созданной системы разнесенных на расстояние 3003 km лазерных интерферометров равноплечего типа [2] была реализована гениальная идея применения интерферометров Майкельсона для регистрации гравитационных волн, выдвинутая еще в 1962 г. [3]. Созданный при огромном финансировании интерференционный комплекс, требующий сложной юстировки и характеризующийся большой неустойчивостью в работе, имеет приемлемые для регистрации выделенных гравитационных сигналов амплитудно-частотные характеристики, которые могут быть улучшены при построении детекторов гравитационных волн по принципу, предложенному в работе [4]. Для реализации идеи, выдвинутой в [4], требуется большое финансирование с последующим долговременным строительством. В настоящей работе рассматривается другая возможность создания подобных лазерно-интерференционных систем в точках расположения лазерных деформографов классического типа на территории России. Задача работы состоит в разработке принципов построения „деформационной антенны Земли“, основанной на других принципах регистрации отклика гравитационных волн, которая по частотному диапазону и по чувствительности превышает гравитационные антенны, созданные в проекте LIGO.

В настоящее время лазерные деформографы функционируют на м. Шульца Приморского края [5], м. Свободный Сахалинской области [6], вблизи Краснокаменска [7], на окраине Фрязино [8], в районе Баксана [9], они также работали в Протвино и вблизи Севастополя [10]. Рассмотрим особенности создания „деформационной антенны Земли“ на основе размещения в данных пунктах лазерных деформографов маятникового и/или классического типа, измерительные оси которых ориентированы по линиям „север–юг“ и „запад–восток“. Создание двухкоординатных лазерных деформографов позволит

в каждом пункте наблюдения определять направление на источник зарегистрированных сигналов [11], а с учетом данных других разнесенных лазерно-интерференционных систем и пеленговать источники зарегистрированных возмущений. С учетом длин измерительных плеч работающих лазерных деформографов расчеты будем проводить для лазерных деформографов с длиной измерительного плеча 50 m. При расчетах будем основываться на формуле для лазерного деформографа маятникового типа

$$\Delta l = A_0 \left\{ \frac{f_0^2}{\sqrt{(f_0^2 - f^2)^2 + (f_0^2 f^2 / Q^2)}} \times \cos \left[2\pi \frac{lf}{v} + \arctg \left(\frac{f_0 f / Q}{f_0^2 - f^2} \right) \right] - 1 \right\},$$

где Δl — измеренное смещение, A_0 — амплитуда волны продольного типа, проходящей вдоль оси лазерного деформографа, f_0 — резонансная частота маятниковой системы, Q — добротность маятниковой системы, f — частота проходящей волны, l — длина измерительного плеча лазерного деформографа, v — скорость продольной волны. Вычисления будем проводить при $f_0 = 0.3$ Hz, $v = 2000$ m/s, $l = 50$ m, $A_0 = 1$, $Q = 300$, $\pi = 3.14$, f изменяется от 3 до 1000 Hz. Будем рассматривать три случая распространения гравитационного возмущения:

- 1) перпендикулярно Земле по линии „север–юг“;
- 2) перпендикулярно Земле по линии „запад–восток“;
- 3) по линии, соединяющей рассматриваемые пункты наблюдения.

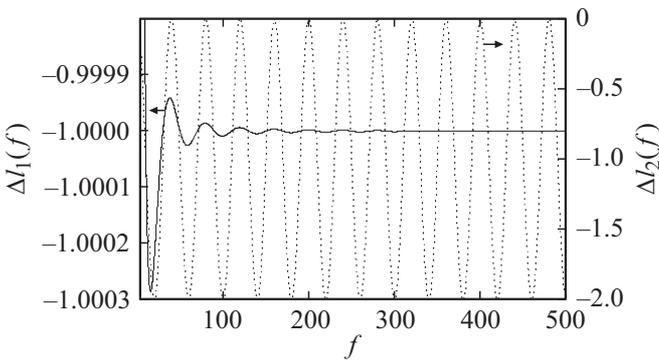
Для расчета чувствительности системы лазерных деформографов с определением их амплитудно-частотных характеристик в таблице приведем расстояния

Расчетные данные

Пункты	L_1 (хорда–расстояние)	L_2 (хорда–широта)	L_3 (хорда–долгота)
1	2	3	4
м. Шульца–м. Свободный	1079 km, 3–278 Hz, $\varepsilon_1 = 4.3 \cdot 10^{-23}$, $\varepsilon_2 = 5 \cdot 10^{-19}$	471 km, 3–637 Hz, $\varepsilon_1 = 2.2 \cdot 10^{-22}$, $\varepsilon_2 = 1 \cdot 10^{-18}$	967 km, 3–310 Hz, $\varepsilon_1 = 5.3 \cdot 10^{-23}$, $\varepsilon_2 = 5 \cdot 10^{-19}$
м. Шульца–Краснокаменск	1300 km, 3–230 Hz, $\varepsilon_1 = 2.9 \cdot 10^{-23}$, $\varepsilon_2 = 4 \cdot 10^{-19}$	509 km, 3–590 Hz, $\varepsilon_1 = 1.9 \cdot 10^{-22}$, $\varepsilon_2 = 1 \cdot 10^{-18}$	988 km, 3–300 Hz, $\varepsilon_1 = 5.1 \cdot 10^{-23}$, $\varepsilon_2 = 5 \cdot 10^{-19}$
м. Шульца–Фрязино	6138 km, 3–48 Hz, $\varepsilon_1 = 1.3 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 8 \cdot 10^{-20}$	1478 km, 3–202 Hz, $\varepsilon_1 = 4.6 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 3 \cdot 10^{-19}$	6162 km, 3–48 Hz, $\varepsilon_1 = 1.3 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 8 \cdot 10^{-20}$
м. Шульца–Севастополь	6961 km, 3–43 Hz, $\varepsilon_1 = 1.0 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 7 \cdot 10^{-20}$	223 km, 3–1345 Hz, $\varepsilon_1 = 1.0 \cdot 10^{-21}$, $\varepsilon_2 = 2 \cdot 10^{-18}$	6987 km, 3–42 Hz, $\varepsilon_1 = 1.0 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 7 \cdot 10^{-20}$
м. Шульца–Протвино	6230 km, 3–48 Hz, $\varepsilon_1 = 1.3 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 8 \cdot 10^{-20}$	1363 km, 3–220 Hz, $\varepsilon_1 = 2.7 \cdot 10^{-23}$, $\varepsilon_2 = 4 \cdot 10^{-19}$	6266 km, 3–47 Hz, $\varepsilon_1 = 1.3 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 8 \cdot 10^{-20}$
м. Шульца–Баксан	6452 km, 3–46 Hz, $\varepsilon_1 = 1.2 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 8 \cdot 10^{-20}$	123 km, 3–2439 Hz, $\varepsilon_1 = 3.3 \cdot 10^{-21}$, $\varepsilon_2 = 4 \cdot 10^{-18}$	6824 km, 3–43 Hz, $\varepsilon_1 = 1.1 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 7 \cdot 10^{-20}$
м. Свободный–Краснокаменск	1891 km, 3–158 Hz, $\varepsilon_1 = 1.4 \cdot 10^{-23}$, $\varepsilon_2 = 3 \cdot 10^{-19}$	356 km, 3–842 Hz, $\varepsilon_1 = 3.9 \cdot 10^{-22}$, $\varepsilon_2 = 1 \cdot 10^{-18}$	1844 km, 3–162 Hz, $\varepsilon_1 = 1.5 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 3 \cdot 10^{-19}$
м. Свободный–Фрязино	6370 km, 3–47 Hz, $\varepsilon_1 = 1.2 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 8 \cdot 10^{-19}$	1006 km, 3–298 Hz, $\varepsilon_1 = 4.9 \cdot 10^{-23}$, $\varepsilon_2 = 5 \cdot 10^{-19}$	6477 km, 3–46 Hz, $\varepsilon_1 = 1.2 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 8 \cdot 10^{-20}$
м. Свободный–Севастополь	7300 km, 3–41 Hz, $\varepsilon_1 = 9.4 \cdot 10^{-25}$, $\varepsilon_2 = 7 \cdot 10^{-20}$	251 km, 3–1195 Hz, $\varepsilon_1 = 7.9 \cdot 10^{-22}$, $\varepsilon_2 = 2 \cdot 10^{-18}$	7235 km, 3–41 Hz, $\varepsilon_1 = 9.6 \cdot 10^{-25}$, $\varepsilon_2 = 7 \cdot 10^{-20}$
м. Свободный–Протвино	6473 km, 3–46 Hz, $\varepsilon_1 = 1.2 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 8 \cdot 10^{-20}$	890 km, 3–337 Hz, $\varepsilon_1 = 6.3 \cdot 10^{-23}$, $\varepsilon_2 = 6 \cdot 10^{-19}$	6575 km, 3–45 Hz, $\varepsilon_1 = 1.1 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 8 \cdot 10^{-20}$
м. Свободный–Баксан	6885 km, 3–43 Hz, $\varepsilon_1 = 1.0 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 7 \cdot 10^{-20}$	351 km, 3–854 Hz, $\varepsilon_1 = 4.0 \cdot 10^{-22}$, $\varepsilon_2 = 1 \cdot 10^{-18}$	6920 km, 3–43 Hz, $\varepsilon_1 = 1.0 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 7 \cdot 10^{-20}$
Краснокаменск–Фрязино	4969 km, 3–60 Hz, $\varepsilon_1 = 2.0 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 1 \cdot 10^{-19}$	649 km, 3–462 Hz, $\varepsilon_1 = 1.2 \cdot 10^{-22}$, $\varepsilon_2 = 8 \cdot 10^{-19}$	5004 km, 3–59 Hz, $\varepsilon_1 = 2.0 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 1 \cdot 10^{-19}$
Краснокаменск–Севастополь	5841 km, 3–51 Hz, $\varepsilon_1 = 1.5 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 8 \cdot 10^{-20}$	609 km, 3–492 Hz, $\varepsilon_1 = 1.3 \cdot 10^{-22}$, $\varepsilon_2 = 8 \cdot 10^{-19}$	5887 km, 3–50 Hz, $\varepsilon_1 = 1.4 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 8 \cdot 10^{-20}$
Краснокаменск–Протвино	5066 km, 3–59 Hz, $\varepsilon_1 = 1.9 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 1 \cdot 10^{-19}$	533 km, 3–562 Hz, $\varepsilon_1 = 1.8 \cdot 10^{-22}$, $\varepsilon_2 = 9 \cdot 10^{-19}$	5102 km, 3–58 Hz, $\varepsilon_1 = 1.9 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 1 \cdot 10^{-19}$
Краснокаменск–Баксан	5319 km, 3–56 Hz, $\varepsilon_1 = 1.8 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 9 \cdot 10^{-20}$	709 km, 3–423 Hz, $\varepsilon_1 = 9.9 \cdot 10^{-23}$, $\varepsilon_2 = 7 \cdot 10^{-19}$	5332 km, 3–56 Hz, $\varepsilon_1 = 1.8 \cdot 10^{-24}$, $\varepsilon_2 = 9 \cdot 10^{-20}$
Фрязино–Севастополь	1297 km, 3–231 Hz, $\varepsilon_1 = 3.0 \cdot 10^{-23}$, $\varepsilon_2 = 4 \cdot 10^{-19}$	1262 km, 3–237 Hz, $\varepsilon_1 = 3.1 \cdot 10^{-23}$, $\varepsilon_2 = 4 \cdot 10^{-19}$	318 km, 3–943 Hz, $\varepsilon_1 = 4.9 \cdot 10^{-22}$, $\varepsilon_2 = 2 \cdot 10^{-18}$
Фрязино–Протвино	132 km, 3–2272 Hz, $\varepsilon_1 = 2.9 \cdot 10^{-21}$, $\varepsilon_2 = 4 \cdot 10^{-18}$	121 km, 3–2479 Hz, $\varepsilon_1 = 3.4 \cdot 10^{-21}$, $\varepsilon_2 = 4 \cdot 10^{-18}$	51 km, 3–5882 Hz, $\varepsilon_1 = 1.9 \cdot 10^{-20}$, $\varepsilon_2 = 1 \cdot 10^{-17}$
Фрязино–Баксан	1416 km, 3–211 Hz, $\varepsilon_1 = 2.3 \cdot 10^{-23}$, $\varepsilon_2 = 4 \cdot 10^{-19}$	1361 km, 3–220 Hz, $\varepsilon_1 = 2.7 \cdot 10^{-23}$, $\varepsilon_2 = 4 \cdot 10^{-19}$	387 km, 3–775 Hz, $\varepsilon_1 = 3.3 \cdot 10^{-22}$, $\varepsilon_2 = 1 \cdot 10^{-18}$

Продолжение

1	2	3	4
Севастополь–Протвино	1168 km, 3–256 Hz, $\epsilon_1 = 3.6 \cdot 10^{-23}$, $\epsilon_2 = 4 \cdot 10^{-19}$	1141 km, 3–262 Hz, $\epsilon_1 = 3.8 \cdot 10^{-23}$, $\epsilon_2 = 4 \cdot 10^{-19}$	263 km, 3–1140 Hz, $\epsilon_1 = 7.2 \cdot 10^{-22}$, $\epsilon_2 = 2 \cdot 10^{-18}$
Севастополь–Баксан	805 km, 3–372 Hz, $\epsilon_1 = 7.7 \cdot 10^{-23}$, $\epsilon_2 = 6 \cdot 10^{-19}$	99 km, 3–3030 Hz, $\epsilon_1 = 5.1 \cdot 10^{-21}$, $\epsilon_2 = 5 \cdot 10^{-18}$	802 km, 3–374 Hz, $\epsilon_1 = 7.8 \cdot 10^{-23}$, $\epsilon_2 = 6 \cdot 10^{-19}$
Протвино–Баксан	1322 km, 3–226 Hz, $\epsilon_1 = 2.9 \cdot 10^{-23}$, $\epsilon_2 = 4 \cdot 10^{-19}$	1236 km, 3–242 Hz, $\epsilon_1 = 3.3 \cdot 10^{-23}$, $\epsilon_2 = 4 \cdot 10^{-19}$	452 km, 3–663 Hz, $\epsilon_1 = 2.4 \cdot 10^{-22}$, $\epsilon_2 = 1 \cdot 10^{-18}$



Амплитудно-частотные характеристики лазерных деформографов маятникового (сплошная линия) и классического (пунктирная линия) типов в частотном диапазоне от 3 до 500 Hz. Для деформографа маятникового типа ось ординат приведена слева, а для деформографа классического типа — справа.

по хордам (не по дуге сферы, так как гравитационный сигнал „пронизывает“ Землю) линий „север–юг“, „запад–восток“ и линии, соединяющей рассматриваемые пункты наблюдения. На рисунке представлена амплитудно-частотная характеристика лазерного деформографа маятникового типа, а также лазерного деформографа классического типа в диапазоне от 3 до 500 Hz. Для больших частот для деформографа маятникового типа измеренное смещение будет везде равно смещению частичек земной коры, вызванному распространяющейся волной, а для классического испытывать периодические изменения, аналогичные периодическим изменениям, до частоты 500 Hz. Расчеты будем проводить по аналогии с [4], только с учетом данных, приведенных в таблице, и при условии использования частотно-стабилизированных лазеров со стабильностью 10^{-14} . В отличие от работы [2] будем считать, что стабильность частоты является одним из важнейших параметров при создании лазерно-интерференционных систем. В соответствии с рисунком считаем, что лазерный деформограф маятникового типа с описанными выше характеристиками измеряет абсолютную амплитуду волны в частотном диапазоне от 3 до 1000 Hz и выше. В соответствии с [4] определим предельную чувствительность каждой пространственно

разнесенной пары лазерных деформографов маятникового типа и ее рабочий диапазон при условии, что мы используем в каждом пункте часы точного времени, по которым синхронизировано время с точностью $1 \mu s$, и не выходим между рассматриваемыми пунктами наблюдения за пределы одной длины гравитационной волны, и с учетом того, что при скорости гравитационной волны, равной $300\,000 \text{ km/s}$, и наименьшей из рассматриваемых частот длина гравитационной волны равна $100\,000 \text{ km}$ (это явно больше любых земных расстояний). При использовании частотно-стабилизированных лазеров со стабильностями частоты 10^{-14} в разных пунктах наблюдения можно утверждать, что в конкретных пунктах наблюдения они обеспечивают необходимую точность измерения с учетом ошибок, обусловленных нестабильностью частоты. В то же время мы считаем, что разные лазеры, расположенные в отдельных точках наблюдения, не подвержены однотипным ошибкам синхронного характера. В отличие от работы [4] на условия эксперимента наложим более жесткие требования. Если в работе [4] априорно принималось, что различные ошибки не вносят искажений в четырнадцатом знаке точности измерения смещений, то в настоящей работе будем считать, что они согласуются с частотной стабильностью лазера и точность измерения смещений на базе прибора будет равна $\Delta l = l \epsilon$, где l — длина измерительного плеча лазерного деформографа, ϵ — стабильность частоты рабочего лазера. При расстоянии между пунктами наблюдений, равном L , и при условии применения часов точного времени, синхронизирующих измерительные комплексы, разнесенные на расстояние L , с точностью $1 \mu s$ и позволяющих отслеживать изменение фазы гравитационной волны с точностью $(\lambda/L) \cdot 10^{-6}$ (где λ — длина гравитационной волн), окончательно имеем

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta l \lambda}{L L} \cdot 10^{-6} = \frac{l \epsilon \lambda}{L L} \cdot 10^{-6}.$$

Здесь ϵ_1 — чувствительность системы из двух разнесенных на расстояние L лазерных деформографов маятникового типа. В таблице приведены расчеты для каждого случая при частоте гравитационной волны, равной 3 Hz. Как видно из таблицы, любые рассматриваемые

расстояния меньше длины гравитационной волны с частотой 3 Hz. Для каждого случая рассчитаем предельную частоту, для которой длина гравитационной волны не превышает максимального расстояния между опорными точками, что определит частотный диапазон (приведен в таблице) для каждого случая регистрации гравитационной волны, который для всех пар начинается с частоты 3 Hz. В работе [1] сообщается о регистрации гравитационных волн с относительной амплитудой $1 \cdot 10^{-21}$ в частотном диапазоне 35–250 Hz. Согласно этому и данным, приведенным в таблице, подобные сигналы можно зарегистрировать на следующих парных деформографах маятникового типа: 1) м. Шульца–м. Свободный; 2) м. Шульца–Краснокаменск; 3) Фрязино–Севастополь; 4) Фрязино–Баксан; 5) Севастополь–Протвино; 6) Севастополь–Баксан; 7) Протвино–Баксан. К парным деформографам для меньших частотных диапазонов, но по чувствительности превосходящим чувствительность пар в интерферометре LIGO, можно отнести следующие: 1) м. Шульца–Севастополь; 2) м. Шульца–Протвино; 3) м. Шульца–Баксан; 4) м. Свободный–Фрязино; 5) м. Свободный–Севастополь; 6) м. Свободный–Протвино; 7) м. Свободный–Баксан; 8) Краснокаменск–Фрязино; 9) Краснокаменск–Севастополь; 10) Краснокаменск–Протвино; 11) Краснокаменск–Баксан.

При регистрации сейсмоакустических сигналов земного происхождения, скорости распространения которых значительно меньше скорости распространения гравитационных волн, в основном нельзя говорить о выполнении измерений на разнесенных лазерных деформографах в пределах одной длины волны. Поэтому чувствительность пар разнесенных лазерных деформографов необходимо считать по формуле

$$\varepsilon_2 = \frac{l\varepsilon}{L}.$$

В таблице приведены данные, рассчитанные по этой формуле. Но следует заметить, что в этом случае ограничения по верхнему частотному диапазону нет. Оно определяется быстродействием электронно-оптических систем и при соответствующем быстродействии может достигать 10 000 Hz. Поэтому можно считать, что для парных систем деформографов маятникового типа при измерении сигналов, длина волны которых меньше расстояния между рассматриваемыми опорными точками, рабочий частотный диапазон находится в пределах от 3 до 10 000 Hz.

В инфразвуковой области для частот, на амплитуду которых не оказывает влияния маятниковая система, амплитудно-частотная характеристика деформографа маятникового типа аналогична амплитудно-частотной характеристике лазерного деформографа классического типа при равенстве их измерительных плеч. Поэтому каждый лазерный деформограф необходимо рассматривать как отдельную установку, т.е. точность измерений будет ограничиваться стабильностью частоты лазера. В нашем

случае она равна $\varepsilon = \Delta l/l = \Delta v/v$. Но уникальность данной системы разнесенных лазерных деформографов в инфразвуковом диапазоне, объединенных в единый комплекс системой точного времени, заключается в возможности определения первоисточника любых возмущений в данном частотном диапазоне с локацией мест их генерации, а также в возможности определения всех упругих параметров сред на пути их распространения, что крайне необходимо для построения работающей модели земной коры, мантии и ядра, создания модели возникновения и развития любых землетрясений с вероятным их краткосрочным прогнозом.

В настоящее время на лазерных деформографах, расположенных на территории России, используются лазеры со стабильностью частоты 10^{-10} – 10^{-12} , что ухудшает параметры ε_1 и ε_2 , приведенные в таблице, на четыре-два порядка. Если для регистрации гравитационных сигналов эту потерю можно частично компенсировать за счет применения термостабилизированных часов точного времени, обеспечивающих точность в восьмом знаке, то для регистрации сигналов, имеющих скорости гораздо меньше скорости света, это сделать практически невозможно. Во всех рассматриваемых случаях можно значительно улучшить интерпретацию полученных результатов, используя метод, предложенный в [4]. Согласно [4], при обработке полученных экспериментальных данных: 1) на первом шаге создаем модели сигналов гравитационного и/или земного происхождения, 2) на втором шаге проводим свертку созданных моделей с полученными записями систем пространственно разнесенных лазерных деформографов, т.е. „прогоняем“ модели по записи систем; 3) при совпадении модели с сигналом, даже сильно зашумленным, свертка даст резкое увеличение амплитуды на записи в месте их совпадения, что и будет доказательством регистрации сигналов модельного вида. Результат свертки может поднять чувствительность систем еще на пять-семь порядков.

Что касается шумов, методики их ликвидации и учета, то во всех лазерных деформографах необходимо проводить мероприятия, предложенные в работах [2] и [4].

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Abbott B.P. et al. (*LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration*) // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116. P. 061102.
- [2] Abbott B.P., Abbott R., Adhikari R. et al. // *Rep. Prog. Phys.* 2009. V. 72. P. 076901.
- [3] Герценштейн М.Е., Пустовойт В.И. // *ЖЭТФ.* 1962. Т. 43. В. 2. С. 605–607.
- [4] Долгих Г.И. // *Письма в ЖТФ.* 2018. Т. 44. В. 20. С. 46–52.
- [5] Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В. // *Физика Земли.* 1998. № 11. С. 76–81.

- [6] Долгих Г.И., Бударин С.С., Долгих С.Г., Закурко А.Г., Косарев О.В., Овчаренко В.В., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. // Измерительная техника. 2016. № 3. С. 34–36.
- [7] Долгих Г.И., Долгих С.Г., Рассказов И.Ю., Луговой В.А., Саксин Б.Г. // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 12. С. 2240–2249.
- [8] Александров Д.В., Дубров М.Н., Кравцов В.В. // Нелинейный мир. 2016. Т. 14. № 1. С. 6–8.
- [9] Милюков В.К., Клячко Б.С., Мясников А.В., Стриганов П.С., Янин А.Ф., Власов А.Н. // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 6. С. 87–103.
- [10] Нестеров В.В. Большебазовые лазерные интерферометры в геофизических исследованиях. Симферополь: Таврия, 1996. 285 с.
- [11] Бородин А.Е., Долгих А.Г., Долгих Г.И., Фищенко В.К. // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 1. С. 59–69.